

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) EP 0 822 027 A1

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
04.02.1998 Patentblatt 1998/06

(51) Int. Cl.⁶: B23K 26/00, B23K 26/08

(21) Anmeldenummer: 96112574.7

(22) Anmeldetag: 03.08.1996

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB IT LI NL SE

(71) Anmelder:
INPRO Innovationsgesellschaft für
fortgeschrittene Produktionssysteme
in der Fahrzeugindustrie mbH
10587 Berlin (DE)

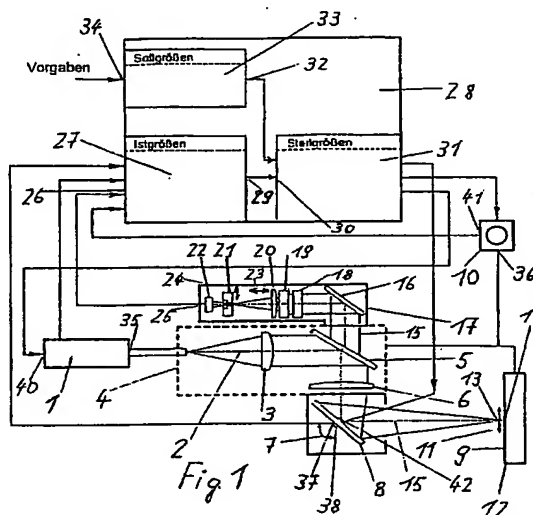
(72) Erfinder:
• Wahl, Roland, Dr.
c/o INPRO.. GmbH
D-10587 Berlin (DE)

• Brandl, Toni
c/o INPRO .. GmbH
D-10587 Berlin (DE)
• Anders, Michael, Dr.
c/o INPRO.. GmbH
D-10587 Berlin (DE)

(74) Vertreter:
Hoffmann, Klaus-Dieter, Dipl.-Ing.
Kurfürstendamm 182
10707 Berlin (DE)

(54) **Verfahren zum Härten von Werkstückoberflächen mittels Strahlen, insbesondere mittels Laserstrahlen, und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens**

(57) Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Strahlhärten, insbesondere Laserstrahlhärten mit geregelter Verteilung der Werkstückoberflächentemperatur längs und quer zur Vorschubrichtung und auf eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens. Durch die angestrebte geregelte Verteilung der Werkstückoberflächentemperatur längs und quer zur Vorschubrichtung soll die Erzeugung gleichbleibender Härtespuren mit gewünschter Geometrie auch bei inhomogenen Werkstückoberflächen gewährleistet werden. Erfindungsgemäß wird hierzu die Temperaturstrahlung des quer zur Vorschubrichtung oszillierenden Auftreffortes des Arbeitslaserstrahlflecks mittels teildurchlässiger Spiegel kolinear zum Strahlengang des Arbeitslasers durch die Härteoptik hindurch einer Temperaturkontroll-einrichtung zugeführt, von der stets momentan die Temperatur in jedem Auftreffort des Arbeitslaserstrahlflecks exakt erfaßt wird. Aus der kontrollierten, einem Regler zugeführten Temperaturverteilung quer zur Vorschubrichtung wird über diesen Regler, dem gleichzeitig die aktuelle Strahlleistung, die aktuelle Vorschubbewegung und die aktuelle Strahlablenkung eingegeben werden unter Berücksichtigung bearbeitungsspezifischer Sollvorgaben zur Erzeugung einer homogenen Temperaturverteilung auf der Werkstückoberfläche für eine entsprechende Anpassung der Stellgrößen, d.h. der Strahlleistung, der Vorschubbewegung und der Auslenkbewegung über den Regler gesorgt.



EP 0 822 027 A1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Härten von Werkstückoberflächen mittels Strahlen, insbesondere mittels Laserstrahlen, bei dem eine laserstrahlformende Härteoptik und die Werkstückoberfläche relativ zueinander bewegt werden, der Auftreffort des Arbeitslaserstrahlflecks während des Härstens durch Ablenkbewegung von Strahlformungseinrichtungen der Härteoptik quer zur Vorschubrichtung oszilliert und die Werkstückoberflächentemperatur fortlaufend gemessen und ihre Verteilung längs der Vorschubrichtung geregelt wird.

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung des Verfahrens, mit einer regelbaren Strahlquelle, insbesondere einem Festkörperlaser, mit einer Härteoptik mit einer strahlformenden Ablenkeinrichtung, von der der Arbeitslaserstrahl auf einer Werkstückoberfläche quer zur Vorschubrichtung oszillierend aufbringbar ist, mit einer Einrichtung zum Erzeugen einer relativen Vorschubbewegung von Härteoptik und Werkstückoberfläche und mit Einrichtungen zum Erfassen der Werkstückoberflächentemperatur.

Die Kontrolle und Regelung der Werkstückoberflächentemperatur beim Strahlhärten wie z.B. dem Laserstrahlhärten ist eine notwendige Voraussetzung zur Optimierung des Arbeitsprozesses. Durch Einhalten einer angepaßten, in der Regel homogenen und geringfügig unterhalb der Schmelztemperatur liegenden Verteilung der Werkstückoberflächentemperatur längs und quer zur Vorschubrichtung werden vorgegebene Härte-spurbreiten mit gleichmäßigen Spurtiefen bei höchstmöglicher Vorschubgeschwindigkeit erreicht. Gleichzeitig verhindert eine solche Regelung die Beschädigung der Oberfläche durch Anschmelzungen, was Nacharbeits- und Ausschußkosten senkt.

Es ist bekannt, bei der Präzisionsbearbeitung von Werkstückoberflächen mit Festkörperlaser zur Erfassung der Werkstückoberflächentemperatur Pyrometer einzusetzen (vgl. z.B. "Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlaser" in "Laser in der Materialbearbeitung", Band 4, 1995, Herausgeber: VDI-Technologiezentrum; Physikalische Technologie). Zur Erfassung der Oberflächentemperatur werden üblicherweise dem Werkstück zugewandte pyrometrische Detektoren zusätzlich zu der laserstrahlformenden Härteoptik montiert und gemeinsam mit dieser in der Vorschubbewegung über das Werkstück verfahren. Sie ermitteln die durchschnittliche Temperatur in ihrem Meßfleck. Der heißeste Ort während des Härtungsvorgangs ist aber der jeweils momentane Auftreffort des Laserstrahlflecks, der aufgrund der strahlformenden Ablenkeinrichtungen quer zur Vorschubrichtung oszilliert, sich somit permanent ändert und dessen Temperatur daher auf diese Weise nur unzureichend erfaßt werden kann.

Zur Erreichung möglichst homogener Werkstückoberflächentemperaturen quer zur Vorschubrichtung werden daher bislang nicht der aktuellen Temperatur-

verteilung angepaßte, sondern konstante Strahlenergieverteilungen mittels fest eingestellter Strahlablenkungsformen erzeugt. Dieses Verfahren liefert jedoch nur bei homogenen Werkstück- und Werkstückoberflächeneigenschaften sowie konstanten Verfahrensrandbedingungen zufriedenstellende Ergebnisse. In Vorschubrichtung wird der Mittelwert der Strahlenergieverteilung auf Basis der gemessenen mittleren Temperatur im Pyrometermeßfleck geregelt.

Für verschiedene Bearbeitungsverfahren von Werkstückoberflächen ist deren definierte Erwärmung gefordert. So wird beim Verfahren zum Strahlhärten von Werkstückoberflächen die Energie eines Strahls derart geformt, daß sie in bestimmter Form (geometrische Ausdehnung und Verteilung) auf die Werkstückoberfläche auftrifft. Der Strahl wird abgelenkt und führt dadurch eine Bewegung auf der Werkstückoberfläche aus. Ziel der Erfindung ist es hierbei, den momentanen Auftreffpunkt des Strahls auf der Werkstückoberfläche zu beobachten und die momentane Temperatur im Auftreffpunkt zu messen. Ein mit der Temperaturmessung gekoppelter Regler generiert unter Verwendung verschiedener Sollgrößen und Istgrößen bestimmte Stellgrößen, so daß sich der geforderte Temperaturverlauf an den Auftrefforten des abgelenkten Strahls ergibt, wobei durch einen Aktor eine Relativbewegung zwischen der Werkstückoberfläche und dem Werkzeug (Härteoptik) erzeugt wird, so daß große Flächen bestrahlt werden können. Die im Regler enthaltenen Regelkreise haben dabei für die Einhaltung der geforderten Temperaturen, die sich aus bearbeitungsspezifischen Vorgaben bestimmen lassen, in jedem einzelnen Auftreffort des Strahls und der Werkstückoberfläche zu sorgen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu seiner Durchführung gemäß der eingangs erwähnten Art zur Verfügung zu stellen, mit dem bzw. der eine geregelte Verteilung der Werkstückoberflächentemperatur längs und quer zur Vorschubrichtung zur Erzeugung gleichbleibender Härtungsspuren mit gewünschter Geometrie auch bei inhomogenen Werkstückoberflächen möglich ist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß

- die Temperaturstrahlung des quer zur Vorschubrichtung oszillierenden Auftreffortes des Arbeitslaserstrahlflecks mittels teildurchlässiger Spiegel kolinear zum Strahlengang des Arbeitslasers durch die Härteoptik hindurch einer Temperaturkontroll-einrichtung zugeführt wird, von der stets momentan die Temperatur im Auftreffort des Arbeitslaserstrahlflecks exakt erfaßt wird, und daß
- die ermittelten Temperaturmeßdaten einem mit der Strahlquelle, der Strahlablenkung und Vorschubbewegung gekoppelten Regler eingegeben werden, in dem eine Temperaturverteilung quer zur Vor-

schubrichtung ermittelt wird und über den eine darauf abgestimmte Verteilung der Laserstrahlenergie und eine angepaßte Steuerung der Ablenkbewegung der Strahlformungseinrichtungen der Härteoptik und der Vorschubbewegung unter Berücksichtigung bearbeitungsspezifischer Vorgaben derart erfolgen, daß eine homogene Temperaturverteilung auf der Werkstückoberfläche längs und quer zur Vorschubrichtung erzeugt wird.

Vorzugsweise werden als bearbeitungsspezifische Vorgaben Materialeigenschaften, die Einhärtetiefe, die Erwärmungs- und Abkühlungsdauer, die Werkstückgeometrie, die Auslenkbewegung, die Vorschubbewegung und die Bearbeitungszeit gewählt.

In Vorschubrichtung wird die Temperatur der heißen Stelle der vom Laser bestrahlten Werkstückoberflächenlinie zur Regelung des Laserleistungsniveaus aufgrund der ortsauflösten Temperaturmessung quer zur Vorschubrichtung genutzt.

Eine Proportionalregelung der Temperatur kann erfolgen, indem vom geforderten Temperatursignal das aktuelle subtrahiert und die Differenz mit einem Faktor X zur Steuerung der Strahlleistung multipliziert wird, wobei die Strahlablenkung periodisch sinusförmig und die Vorschubgeschwindigkeit konstant gehalten werden.

Auch kann eine komplexe Regelung der Temperatur durchgeführt werden, indem aus dem Temperaturverlauf eines vorausgegangenen Arbeitszyklusses eine Ablenkungsbewegung erzeugt wird, die durch die entsprechende Geschwindigkeit die geforderte Temperatur für den folgenden Arbeitszyklus einstellt, wobei zur Anpassung der Einwirkdauer des Strahls für jeden einzelnen Punkt bei hohen Temperaturen die Ablenkgeschwindigkeit abschnittsweise erhöht und bei niedrigen abschnittsweise gesenkt wird und wobei die Strahlablenkung und die Vorschubbewegung annähernd so gehalten werden, daß die Strahlquelle immer an der Leistungsgrenze gehalten wird.

Bekannte Abschnitte fehlender Werkstückoberflächen (Bohrungen oder Kanten am Werkstück) werden bevorzugt mit hoher Ablenkgeschwindigkeit übersprungen.

Erfolgen Strahlablenkung und Vorschubbewegung gemäß dem Idealfall so, daß die Strahlquelle immer an ihrer Leistungsgrenze gehalten wird, ergibt sich eine relativ kurze Bearbeitungszeit. Wird während der Strahlablenkung die geforderte Temperatur schon bei niedrigen Strahlleistungen erreicht, kann die Vorschubgeschwindigkeit bis an die Strahlleistungsgrenze erhöht werden.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zeichnet sich dadurch aus, daß

- die Härteoptik mindestens einen teildurchlässigen Spiegel aufweist, durch den unmittelbar vom Auf-

treffort des Arbeitslaserstrahlflecks kommende Temperaturstrahlung über die Ablenkeinrichtung durch die Härteoptik hindurch einer Temperaturkontrolleinrichtung zuführbar ist, von der stets momentan die Temperatur am Auftreffort des Arbeitslaserstrahlflecks auch quer zur Vorschubrichtung meßbar ist,

- daß der Ausgang der Temperaturkontrolleinrichtung mit einem Eingang eines Istgrößen verarbeitenden Regelkreises eines Reglers verbunden ist, dem die Meßdaten der Temperaturverteilung quer zur Vorschubrichtung zur Verarbeitung eingebbar sind und der mit dem Ausgang der Strahlquelle, dem Ausgang der Einrichtung zum Erzeugen der relativen Vorschubbewegung und dem Ausgang des Antriebs der Ablenkeinrichtung zur Aufnahme der Ist-Strahlleistung bzw. der Ist-Vorschubbewegung bzw. der Ist-Strahlablenkung verbunden ist,

- daß der den Istgrößen zugeordnete Regelkreis des Reglers ausgangsseitig mit dem Eingang eines Stellgrößen erzeugenden Regelkreises des Reglers verbunden ist, der eingangsseitig zugleich mit dem Ausgang eines Sollgrößen verarbeitenden Regelkreises des Reglers verbunden ist, dessen Eingang bearbeitungsspezifische Vorgaben aufnimmt, und

- daß der Ausgang des Stellgrößen erzeugenden Regelkreises des Reglers mit dem Eingang der Strahlquelle, dem Eingang der Einrichtung zum Erzeugen der relativen Vorschubbewegung und dem Eingang des Antriebs der Ablenkeinrichtung zur Steuerung einer an einen homogenen Temperaturverlauf angepaßten Verteilung der Laserstrahlenergie bzw. angepaßten Vorschubbewegung bzw. angepaßten Strahlablenkung verbunden ist.

Vorzugsweise weist die Temperaturkontrolleinrichtung einen dem teildurchlässigen Spiegel der Härteoptik in Richtung des Verlaufs der Temperaturstrahlung nachgeordneten Umlenkspiegel auf, von dem die Temperaturstrahlung durch eine Reihenanzordnung eines Bandpaßfilters, einer Blende und einer Linse lenkbar ist, von der die Temperaturstrahlung auf eine nachgeordnete Lochblende fokussierbar ist, der ein IR-Detektor in Strahlrichtung nachgeordnet ist, von dem stets die Temperatur im Auftreffort des quer zur Vorschubrichtung oszillierenden Arbeitslaserstrahlflecks exakt meßbar ist.

Die Ablenkeinrichtung der Härteoptik kann ein Scanner- oder Schwingspiegel sein.

Da gemäß der Erfindung dafür gesorgt wird, daß die gemessene Temperaturstrahlung der Werkstückoberfläche den selben Strahlweg wie der Leistungsstrahl inklusive aller den Arbeitsstrahl formender Ablenkspiegel durchläuft, wird erreicht, daß stets exakt

die Temperatur am Auftreffort des Laserstrahlflecks gemessen wird. Durch die Ablenkbewegung der Strahlformungseinrichtungen für den Laserstrahl wird somit die Verteilung der maximalen Werkstückoberflächentemperaturen quer zur Vorschubrichtung erhalten. Durch die sich anschließende verhältnismäßig schnelle Meßdatenverarbeitung ist es möglich, aus der gemessenen Temperaturverteilung mittels geeigneter Algorithmen eine darauf abgestimmte Verteilung der Laserstrahlenergie zu erzeugen, die für die gewünschte homogene Temperaturverteilung sorgt. Als Stellgrößen hierzu werden die Bewegungsformen der zur Strahlformung eingesetzten beweglichen Strahlablenkspiegel genutzt, bei einem hinreichend schnell steuerbaren Laser auch der zeitliche Verlauf der Laserleistung.

Als besondere Vorteile der Erfindung erweisen sich:

- durch ortsaufgelöste Temperaturmessung und angepaßte Regelstrategie die Erzeugung gleichbleibender Härtungsspuren mit gewünschter Geometrie auch bei inhomogenen Werkstückoberflächen;
- die mögliche Einhaltung gewünschter Werkstückoberflächentemperaturen auch bei Schwankung beeinflussender Verfahrensrandbedingungen, wie z.B. der Eigenwärme der Werkstücke;
- die Nutzung des selben Strahlwegs für Meßstrahlung und Laserleistungsstrahlung, wodurch eine exakte Temperaturmessung am momentanen Laserstrahlauftreffort (heißeste Stelle) ohne großen apparativen Aufwand ermöglicht ist;
- eine unbeeinträchtigte Zugänglichkeit zu den Werkstücken, da keine dem Werkstück zugewandten, zusätzlichen Komponenten benötigt werden; und
- die Verwendung ohnehin für das Härten benötigter Stellglieder zur Temperaturregelung (Laserleistungssteuerung und programmierbare Strahlablenksysteme).

Die Erfindung wird nun anhand der Zeichnungen erläutert. In diesen sind:

Fig. 1 eine prinzipielle blockschaltbildartige Darstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 2 ein Diagramm, das bei einer Regelung der Strahlenergieverteilung quer zur Bearbeitungsrichtung durch Scannerbeeinflussung den gemessenen Temperaturverlauf über die Spurbreite zeigt,

Fig. 3 ein Diagramm, das für das in Fig. 1 gezeigte Beispiel eine vom Regler zum Ausgleich generierte Scannerbahn zeigt,

Fig. 4 ein Diagramm, in dem die Temperatur über die Spurlänge in Bearbeitungsrichtung aufgetragen und die Regelung der Energie in Vorschubrichtung erkennbar ist,

Fig. 5 ein Diagramm, aus dem die ortsaufgelöste Temperaturmessung während des Härtens mit temperaturgeregelter Scannerbewegung hervorgeht,

Fig. 6 ein Diagramm, aus dem die ortsaufgelöste Temperaturmessung während des Härtens mit sinusförmiger Scannerbewegung ohne Reglereinsatz hervorgeht,

Fig. 7 eine schematische Darstellung, aus der ein allmähliches Erreichen der geplanten Spurtiefe ohne Temperaturregelung hervorgeht und

Fig. 8 eine schematische Darstellung, aus der ein schnelles Erreichen der geplanten Spurtiefe bei Temperaturregelung hervorgeht.

Wie aus Fig. 1 hervorgeht, die ein Prinzipbild der Vorrichtung zur Regelung der Werkstückoberflächentemperatur zeigt, wird der von einer Strahlquelle 1, z.B. einem Festkörperlaser kommende Leistungsstrahl 2 einer laserstrahlformenden Härteoptik 4 zugeführt, in der er von einer Linse 3 auf einen teildurchlässigen Umlenkspiegel 5 gelenkt und nach Umlenkung um 90° durch letzteren über eine weitere Linse 6 auf einen hinsichtlich seiner Ablenkgeschwindigkeit (Pfeil 7) steuerbaren Schwingspiegel 8 gerichtet wird, von dem er auf die Oberfläche 9 eines von einem Antriebsmotor 10 bewegbaren (siehe Doppelpfeil 11) Werkstücks 12 derart zum Härten des letzteren zu einem Strahlfleck 13 fokussiert wird, daß der Auftreffort 14 des Arbeitslaserstrahlflecks 13 während des Härtens durch die Ablenkbewegung des Schwingspiegels 8 quer zur Vorschubrichtung 11 des Werkstücks 12 oszilliert.

Die unmittelbar vom jeweiligen Auftreffort 14 des Arbeitslaserstrahlflecks 13 kommende Temperaturstrahlung 15 wird kolinear zum Strahlgang 2 des Arbeitslasers 1 durch die Härteoptik 4 hindurchgeführt, d.h. sie verläuft, wie aus Fig. 1 ersichtlich, vom Auftreffort 14 des Arbeitslaserstrahlflecks 13 zum Schwingspiegel 8 und von diesem über die Linse 6 zu dem teildurchlässigen Spiegel 5 der Härteoptik 4, durch den sie hindurchtritt und auf einen Umlenkspiegel 16 einer Temperaturkontrolleinrichtung 17 gelangt, von dem die Temperaturstrahlung nach Umlenkung um 90° in der Temperaturkontrolleinrichtung 17 durch eine Anordnung aus einem Bandpaßfilter 18, einer Blende 19 und

einer Linse 20 gelenkt und von letzterer auf eine Lochblende 21 fokussiert wird, der in Strahlrichtung ein IR-Detektor 22 nachgeordnet ist. Die Linse 20 und die Lochblende 21 sind, wie aus den Doppelpfeilen 23 bzw. 24 ersichtlich ist, in Strahlrichtung bzw. senkrecht zu dieser hin- und herbeweglich. Von dem IR-Detektor 22 wird stets exakt die Temperatur in jedem Auftreffpunkt 14 des Arbeitslaserstrahlflecks unmittelbar gemessen.

Mit dem IR-Detektor 22 und damit mit dem Ausgang 25 der Temperaturkontroleinrichtung 17 ist ein Eingang 26 eines Istgrößen verarbeitenden Regelkreises 27 eines Reglers 28 verbunden, dessen Ausgang 29 wiederum mit dem Eingang 30 eines Stellgrößen erzeugenden Regelkreises 31 des Reglers 28 verbunden. Der Eingang 30 des Regelkreises 31 ist weiterhin mit dem Ausgang 32 eines weiteren Sollgrößen verarbeitenden Regelkreises 33 des Reglers 28 verbunden, in dessen Eingang 34 bearbeitungsspezifische Vorgaben als Bearbeitungsparameter eingegbar sind.

Der Eingang 26 des Regelkreises 27 des Reglers 28 ist weiterhin mit dem Ausgang 35 der Strahlquelle 1, dem Ausgang 36 des die Vorschubbewegung erzeugenden Antriebsmotors 10 und dem Ausgang 37 eines Antriebs 38 des hinsichtlich seiner Ablenkgeschwindigkeit steuerbaren Schwingspiegels 8 zur Aufnahme der Ist-Strahlleistung bzw. der Ist-Vorschubbewegung bzw. der Ist-Strahlablenkung verbunden.

Dem Eingang 34 des Sollgrößen verarbeitenden Regelkreises 33 des Reglers 28 werden als bearbeitungsspezifische Vorgaben, aus der sich die geforderten Temperaturen bestimmen lassen, z.B. Materialeigenschaften, die Einhärtiefe, die Erwärmungs- und Abkühlungsdauer, die Werkstückgeometrie, die Auslenkbewegung, die Vorschubbewegung und die Bearbeitungszeit eingegeben.

Der Ausgang 39 des Regelkreises 31 des Reglers 28, in dem aus den über den Eingang 30 eingegebenen Istgrößen und Sollgrößen nach deren Abgleich die erforderlichen Stellgrößen erzeugt werden, ist mit dem Eingang 40 der Strahlquelle 1, dem Eingang 41 des Antriebsmotors 10 und dem Eingang 42 des Antriebs 38 des Schwingspiegels 8 zur Steuerung einer an den geforderten homogenen Temperaturverlauf angepaßten Verteilung der Laserstrahlenergie bzw. angepaßten Vorschubbewegung bzw. angepaßten Strahlablenkung verbunden.

Über eine verhältnismäßig schnelle Meßdatenverarbeitung der stets in den Auftrefforten 14 des Arbeitslaserstrahlflecks 13 momentan exakt gemessenen Temperaturen ist somit eine optimale Erreichung homogener Werkstückoberflächentemperaturen längs und quer zur Vorschubrichtung 11 auf einfache Weise möglich.

Die Fig. 2 und 3 stehen im Zusammenhang mit einer Teilstrategie zur Verfahrensoptimierung, bei der die Regelung der Strahlenergieverteilung quer zur Bearbeitungsrichtung durch Scannerbeeinflussung erfolgt, wobei auch eine geregelte Oberflächentempera-

turverteilung bei inhomogenen Werkstückeigenschaften wie z.B. lokalen Verzunderungen, Bohrlöcher und die Annäherung an Kanten angestrebt wird. Wie Fig. 2 zeigt, aus der die gemessene Temperaturverteilung über die Spurbreite hervorgeht, ist die Temperatur im Diagramm rechts oben schon fast zu heiß, da sie an die Schmelztemperatur T_{schmelz} herankommt.

Das Diagramm gemäß Fig. 3 zeigt die vom Regler in diesem Fall zum Ausgleich generierte Scannerbahn, wobei eine schnellere Durchfahrt der rechten Spurseite zu erkennen ist.

Das Diagramm gemäß Fig. 4, in dem die Temperatur über die Spurlänge aufgetragen ist, steht im Zusammenhang mit einer weiteren Teilstrategie zur Verfahrensoptimierung, bei der eine Regelung der Energie in Vorschubrichtung (Streckenenergie) erfolgt. Der Temperaturverlauf zeigt, daß bei Punkt 1 eine Absenkung der Laserleistung P_L und bei Punkt 2 eine Erhöhung der Laserleistung P_L durch die Regelung der Streckenenergie in Vorschubrichtung erfolgt. Eine derartige Vorgehensweise läßt sich prinzipiell auch mit handelsüblichen, örtlich weniger gut aufgelöst messenden Pyrometern aufbauen, wobei jedoch nur eine mittlere Temperatur über der Bearbeitungszone als Signal genutzt werden kann. Da erfindungsgemäß jedoch quer zur Vorschubrichtung aufgelöst und äußerst schnell gemessen werden kann, erweist sich das erfindungsgemäße Verfahren auch bei dieser Teilstrategie noch präziser, und es kann z.B. die Temperatur der tatsächlich heißesten Einzelstelle als Signal genutzt werden.

Eine dritte Teilstrategie zur Verfahrensoptimierung basiert auf dem geregelten Anfahren der Arbeitsbewegung, d.h. erfindungsgemäß auf der temperaturgeregelten Festlegung des Anfahrzeitpunktes. Diese Vorgehensweise, die sich jederzeit aus der Regelung der Strahlenergieverteilung quer zur Bearbeitungsrichtung durch Scannerbeeinflussung und der Regelung der Energie in Vorschubrichtung durch Koppelung des Reglers mit dem Antriebsmotor für die Vorschubbewegung herstellen läßt, ist ebenfalls äußerst präzise durchführbar.

Aus dem Diagramm gemäß Fig. 5 geht die ortsauflöste Temperaturmessung während des Härtens mit temperaturgeregelter Scannerbewegung hervor, wobei der Regler die Scannerbewegung so anpaßt, daß wunschgemäß, wie Fig. 5 zeigt, überall gleich hohe Temperaturen entstehen.

Die Parameter sind in diesem Fall wie folgt:

$P = 2500 \text{ W}$
 $V = 0,7 \text{ m/min}$
 Strahldurchmesser: 6,1 mm
 Scanbreite: 14,6 mm

Das Diagramm gemäß Fig. 6 zeigt demgegenüber die ortsauflöste Temperaturmessung während des Härtens mit sinusförmiger Scannerbewegung ohne den Einsatz des Reglers, wobei sich in randnahen Zonen

höhere Temperaturen und im mittleren Bereich niedrigere Temperaturen ergeben, wie aus dem Diagramm ablesbar ist.

Die Parameter sind hier dieselben wie in bezug auf Fig. 5 angegeben.

Die Fig. 7 und 8 geben schließlich schaubildartig das allmähliche Erreichen der geplanten Spurtiefe beim Anfahren der Vorschubbewegung während des Härtens ohne Temperaturregelung bzw. das schnelle Erreichen der geplanten Spurtiefe beim Anfahren der Vorschubbewegung während des Härtens mit Temperaturregelung gemäß der oben beschriebenen Teilstrategie zur Verfahrensoptimierung wieder.

Liste der Bezugszeichen

1	Strahlquelle, Festkörperlaser	
2	Leistungsstrahl, Strahlengang des Arbeitslasers	
3	Linse	
4	Härteoptik	20
5	teildurchlässiger Umlenkspiegel	
6	Linse	
7	Pfeil für Ablenkgeschwindigkeit	
8	Schwingspiegel	
9	Werkstückoberfläche	25
10	Antriebsmotor	
11	Doppelpfeil für Vorschubrichtungen	
12	Werkstück	
13	Arbeitslaserstrahlfleck	
14	Auftreffort	30
15	Temperaturstrahlung	
16	Umlenkspiegel	
17	Temperaturkontrolleinrichtung	
18	Bandpaßfilter	
19	Blende	35
20	Linse	
21	Lochblende	
22	IR-Detektor	
23	Doppelpfeil für Bewegung der Linse 20	
24	Doppelpfeil für Bewegung der Lochblende 21	40
25	Ausgang der Temperaturkontrolleinrichtung	
26	Eingang des Regelkreises 27	
27	Regelkreis für Istgrößen	
28	Regler	
29	Ausgang des Regelkreises 27 für Istgrößen	45
30	Eingang des Regelkreises 31 für Stellgrößen	
31	Regelkreis für Stellgrößen	
32	Ausgang des Regelkreises 33 für Sollgrößen	
33	Regelkreis für Sollgrößen	
34	Eingang des Regelkreises 33 für Sollgrößen	50
35	Ausgang der Strahlquelle 1	
36	Ausgang des Antriebsmotors 10	
37	Ausgang des Antriebs 38 des Schwingspiegels 8	
38	Antrieb des Schwingspiegels 8	
39	Ausgang des Regelkreises 31 für Stellgrößen	55
40	Eingang der Strahlquelle 1	
41	Eingang des Antriebsmotors 10	
42	Eingang des Antriebs 38 des Schwingspiegels 8	

Patentansprüche

- Verfahren zum Härten von Werkstückoberflächen mittels Strahlen, insbesondere mittels Laserstrahlen, bei dem eine laserstrahlformende Härteoptik und die Werkstückoberfläche relativ zueinander bewegt werden, der Auftreffort des Arbeitslaserstrahlflecks während des Härtens durch Ablenkbewegung von Strahlformungseinrichtungen der Härteoptik quer zur Vorschubrichtung oszilliert und die Werkstückoberflächentemperatur fortlaufend gemessen und ihre Verteilung längs der Vorschubrichtung geregelt wird, dadurch gekennzeichnet, daß
 - die Temperaturstrahlung des quer zur Vorschubrichtung oszillierenden Auftreffortes des Arbeitslaserstrahlflecks mittels teildurchlässiger Spiegel kolinear zum Strahlengang des Arbeitslasers durch die Härteoptik hindurch einer Temperaturkontrolleinrichtung zugeführt wird, von der stets momentan die Temperatur im Auftreffort des Arbeitslaserstrahlflecks exakt erfaßt wird, und daß
 - die ermittelten Temperaturmeßdaten einem mit der Strahlquelle, der Strahlablenkung und Vorschubbewegung gekoppelten Regler eingegeben werden, in dem eine Temperaturverteilung quer zur Vorschubrichtung ermittelt wird und über den eine darauf abgestimmte Verteilung der Laserstrahlenergie und eine angepaßte Steuerung der Ablenkbewegung der Strahlformungseinrichtungen der Härteoptik und der Vorschubbewegung unter Berücksichtigung bearbeitungsspezifischer Vorgaben derart erfolgen, daß eine homogene Temperaturverteilung auf der Werkstückoberfläche längs und quer zur Vorschubrichtung erzeugt wird.
- Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als bearbeitungsspezifische Vorgaben Materialeigenschaften, die Einhärtetiefe, die Erwärmungs- und Abkühlungsdauer, die Werkstückgeometrie, die Auslenkbewegung, die Vorschubbewegung und die Bearbeitungszeit gewählt werden.
- Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine Proportionalregelung der Temperatur erfolgt, indem vom geforderten Temperatursignal das aktuelle subtrahiert und die Differenz mit einem Faktor X zur Steuerung der Strahlleistung multipliziert wird, wobei die Strahlablenkung periodisch sinusförmig und die Vorschubgeschwindigkeit konstant gehalten werden.
- Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet,

zeichnet, daß eine komplexe Regelung der Temperatur erfolgt, indem aus dem Temperaturverlauf eines vorausgegangenen Arbeitszyklusses eine Ablenkungsbewegung erzeugt wird, die durch die entsprechende Geschwindigkeit die geforderte Temperatur für den folgenden Arbeitszyklus einstellt, wobei zur Anpassung der Einwirkdauer des Strahls für jeden einzelnen Punkt bei hohen Temperaturen die Ablenkgeschwindigkeit abschnittsweise erhöht und bei niedrigen abschnittsweise gesenkt wird und wobei die Strahlablenkung und die Vorschubbewegung annähernd so gehalten werden, daß die Strahlquelle immer an der Leistungsgrenze gehalten wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß bekannte Abschnitte fehlender Werkstückoberfläche (Bohrungen oder Kanten am Werkstück) mit hoher Ablenkgeschwindigkeit übersprungen werden.

6. Verfahren nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß in Vorschubrichtung die Temperatur der heißesten Stelle der vom Laser bestrahlten Werkstückoberflächenlinie zur Regelung des Laserleistungsniveaus aufgrund der orts aufgelösten Temperaturmessung quer zur Vorschubrichtung genutzt wird.

7. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 6, mit einer regelbaren Strahlquelle, insbesondere einem Festkörperlaser, mit einer Härteoptik mit einer strahlformenden Ablenkeinrichtung, von der der Arbeitslaserstrahl auf einer Werkstückoberfläche quer zur Vorschubrichtung oszillierend aufbringbar ist, mit einer Einrichtung zum Erzeugen einer relativen Vorschubbewegung von Härteoptik und Werkstückoberfläche und mit Einrichtungen zum Erfassen der Werkstückoberflächentemperatur, dadurch gekennzeichnet, daß

- die Härteoptik (4) mindestens einen teildurchlässigen Spiegel (5) aufweist, durch den die unmittelbar vom Auftreffort (14) des Arbeitslaserstrahlflecks (13) kommende Temperaturstrahlung (15) über die Ablenkeinrichtung (8) durch die Härteoptik (4) hindurch einer Temperaturkontrollereinrichtung (17) zuführbar ist, von der stets momentan die Temperatur am Auftreffort (14) des Arbeitslaserstrahlflecks (13) auch quer zur Vorschubrichtung (11) meßbar ist,

- daß der Ausgang (25) der Temperaturkontrollereinrichtung (17) mit einem Eingang (26) eines Istgrößen verarbeitenden Regelkreises (27) eines Reglers (28) verbunden ist, dem die

Meßdaten der Temperaturverteilung quer zur Vorschubrichtung (11) zur Verarbeitung eingebbar sind und der mit dem Ausgang (35) der Strahlquelle (1), dem Ausgang (36) der Einrichtung (10) zum Erzeugen der relativen Vorschubbewegung und dem Ausgang (37) des Antriebs (38) der Ablenkeinrichtung (8) zur Aufnahme der Ist-Strahlleistung bzw. der Ist-Vorschubbewegung bzw. der Ist-Strahlablenkung verbunden ist,

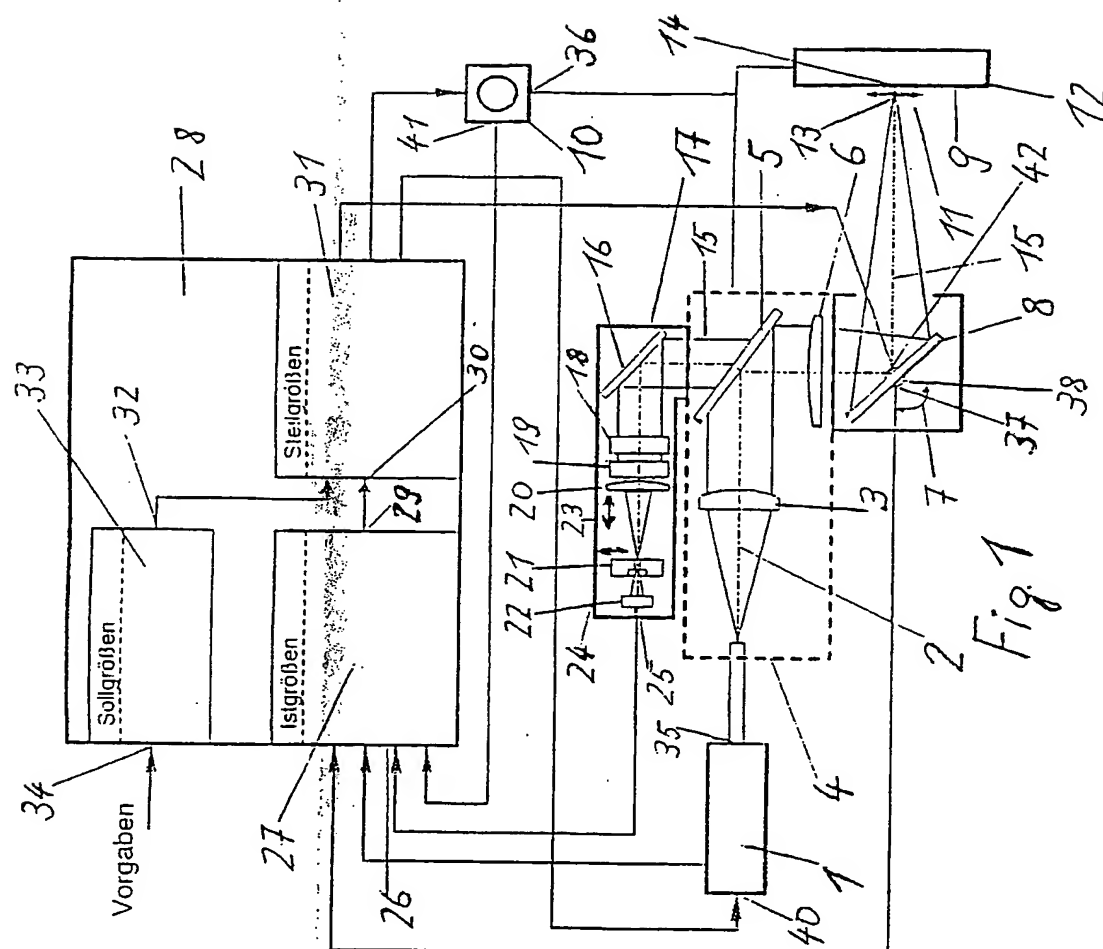
- daß der den Istgrößen zugeordnete Regelkreis (27) des Reglers (28) ausgangsseitig mit dem Eingang (30) eines Stellgrößen erzeugenden Regelkreises (31) des Reglers (28) verbunden ist, der eingangsseitig zugleich mit dem Ausgang (32) eines Sollgrößen verarbeitenden Regelkreises (33) des Reglers (28) verbunden ist, dessen Eingang (34) bearbeitungsspezifische Vorgaben (Bearbeitungsparameter) aufnimmt, und

- daß der Ausgang (39) des Stellgrößen erzeugenden Regelkreises (31) des Reglers (28) mit dem Eingang (40) der Strahlquelle (1), dem Eingang (41) der Einrichtung (10) zum Erzeugen der relativen Vorschubbewegung (11) und dem Eingang (41) des Antriebs (38) der Ablenkeinrichtung (8) zur Steuerung einer an einen homogenen Temperaturverlauf angepaßten Verteilung der Laserstrahlenergie bzw. angepaßten Vorschubbewegung bzw. angepaßten Strahlablenkung verbunden ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperaturkontrollereinrichtung (17) einen dem teildurchlässigen Spiegel (5) der Härteoptik (4) in Richtung des Verlaufs der Temperaturstrahlung (15) nachgeordneten Umlenkspiegel (16) aufweist, von dem die Temperaturstrahlung (15) durch eine Reihenanzahl eines Bandpaßfilters (18) einer Blende (19) und einer Linse (20) lenkbar ist, von der die Temperaturstrahlung (15) auf eine nachgeordnete Lochblende (21) fokussierbar ist, der ein IR-Detektor (22) in Strahlrichtung nachgeordnet ist, von dem stets die Temperatur im Auftreffort (14) des quer zur Vorschubrichtung (11) oszillierenden Arbeitslaserstrahlflecks (13) exakt meßbar ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Ablenkeinrichtung (8) der Härteoptik (4) ein Schwingspiegel ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Ablenkeinrichtung (8) der Härteoptik (4) ein Scannerspiegel ist.



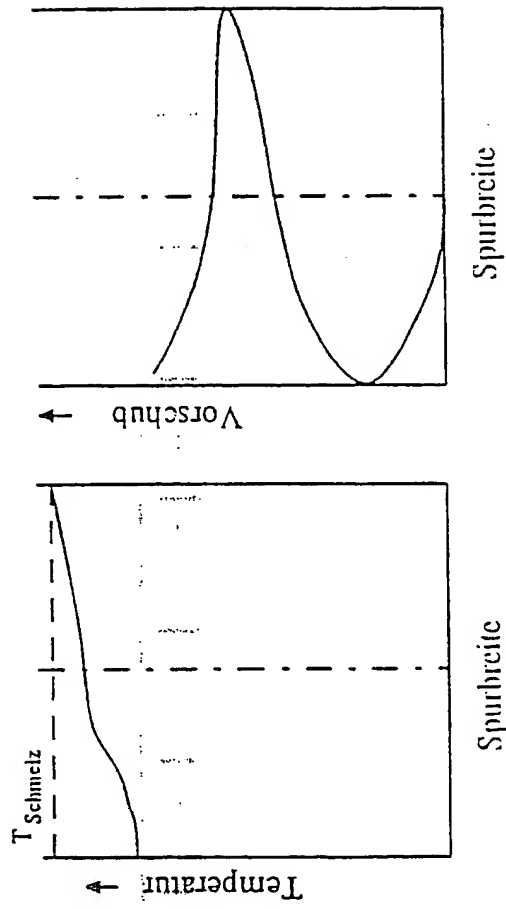


Fig. 3

Fig. 2

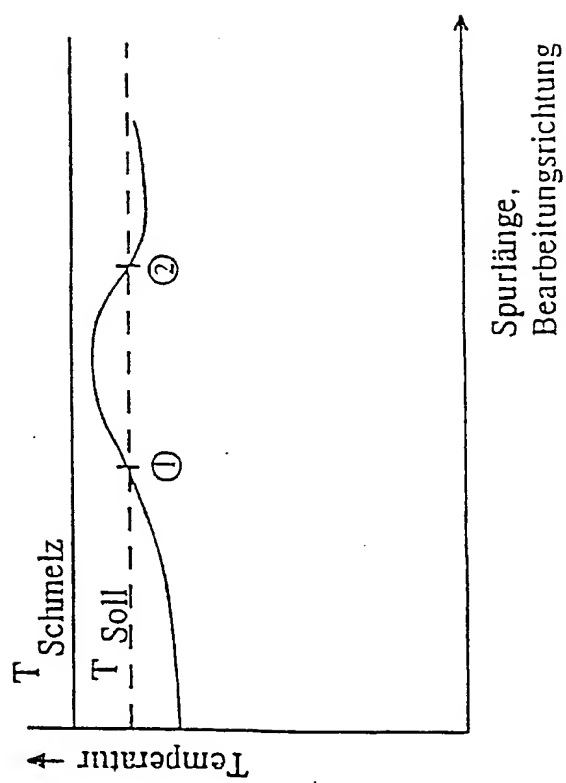


Fig. 4

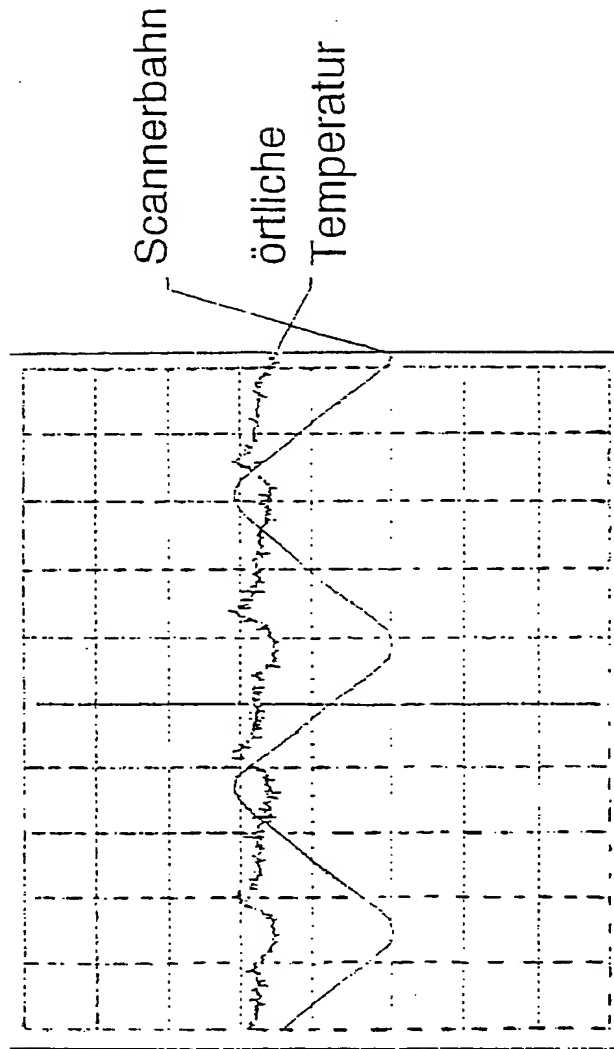


Fig. 5

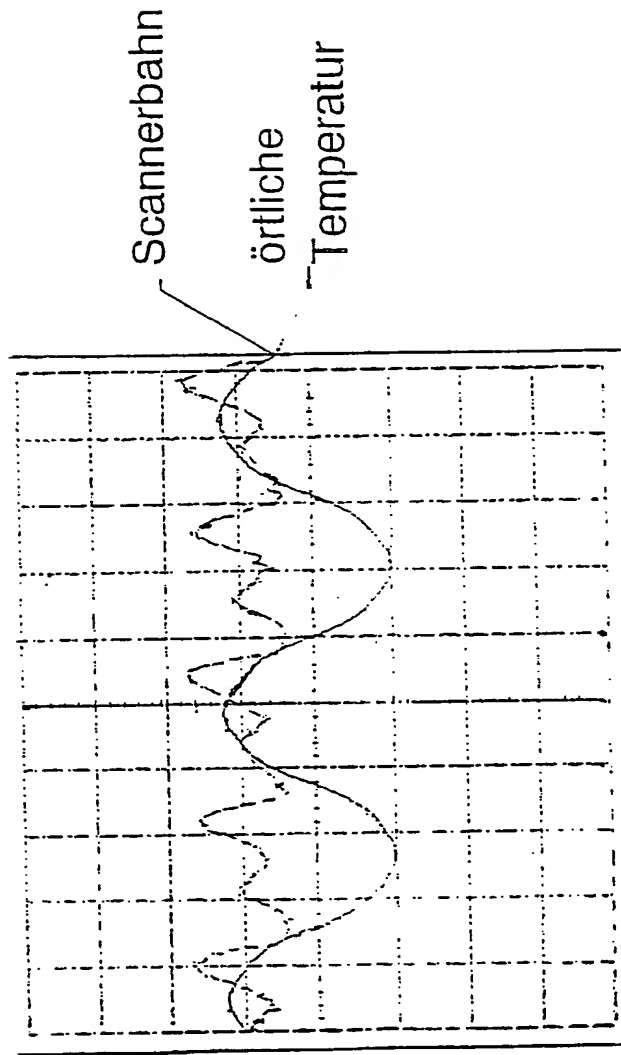
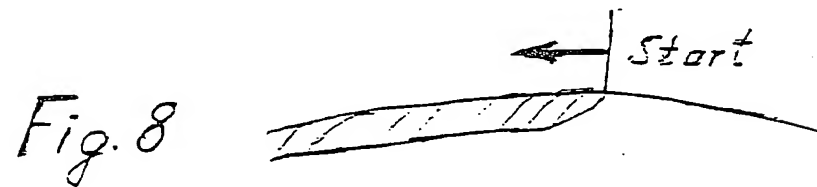


Fig. 6





Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 96 11 2574

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)
A	US-A-5 196 672 (MATSUYAMA HIDENOBU ET AL) 23.März 1993 * das ganze Dokument *	1,7	B23K26/00 B23K26/08
A	US-A-4 539 461 (BENEDICT GARY F ET AL) 3.September 1985 * Spalte 5, Zeile 4 - Spalte 5, Zeile 29; Abbildungen 1,5 *	1,7,9,10	
A	US-A-5 500 502 (HORITA MANABU ET AL) 19.März 1996 * Spalte 5, Zeile 6 - Spalte 5, Zeile 22; Anspruch 3; Abbildungen 1-3 *	7,8	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)
			B23K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort MÜNCHEN		Abschließdatum der Recherche 6.November 1996	Prüfer Concannon, B
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

EP 0 FORM 1503 (03.81) (PMA03)